МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.179 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-3-250-255

Обоснование выбора способов контроля утечек на газопроводе*

А. Д. Лебедь[1], С. П. Глушко[2]**
[1,2] Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

Selection rationale for leakage monitoring in gas pipeline***

A. D. Lebed[1], S. P. Glushko[2]**
[1,2] Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

Введение. Анализируются эффективные методы обнаружения утечек и учета расхода газа. Целью работы является выбор автоматической системы методов, позволяющей повысить качество контроля утечек и учета расхода газа на магистральных газопроводах.
Материалы и методы. Рассмотрены следующие методы обнаружения утечек газа в трубопроводе: по профилю давления, объемно-балансовый, метод акустической эмиссии, метод переменного перепада давления на вынуждающем устройстве, ультразвуковой метод.
Результаты исследования. Анализ показывает, что все методы контроля утечек и расхода газа зависят от параметров окружающей среды. Поэтому важной задачей является достижение независимости результатов измерений от изменения параметров среды. У большинства расходомеров изменение плотности, давления и температуры среды существенно сказывается на результатах измерения. Возникающая при этом дополнительная погрешность может достигать больших величин.

Ключевые слова: магистральный газопровод, контроль, утечки, система управления, робот.

Образец для цитирования: Лебедь А. Д. Обоснование выбора способов контроля утечек на газопроводе / А. Д. Лебедь, С. П. Глушко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 3. — С. 250−255. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-3-250-255

Introduction. Efficient leak detection methods and gas flow metering are analyzed. The work objective is to select an automatic system of methods providing the improvement of the quality of leakage monitoring and gas flow metering in gas pipelines.
Materials and Methods. The following techniques for detecting gas leakage in the pipeline are considered: according to the pressure profile, volume balance method, acoustic emission method, variable-pressure drop method on the forcing device, ultrasonic method.
Research Results. The analysis shows that all techniques for monitoring leakage and gas flow are dependent on the environmental parameters. Therefore, an important task is to achieve independence of the measurement results from changes in the environmental parameters. In most flow meters, changes in density, pressure and temperature affect drastically the measurement results. An additional error that arises in this case can reach large values.

Keywords: main gas pipeline, control, leakage, control system, robot.

For citation: A.D. Lebed, S.P. Glushko. Selection rationale for leakage monitoring in gas pipeline. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 250−255. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-3-250-255

Введение. В связи с высокими темпами развития газовой промышленности, ростом удельного веса природного газа относительно других источников энергии на внутреннем российском рынке и увеличением потребления газа на мировом рынке актуальными задачами являются снижение потерь газа и повышение безопасности эксплуатации газопроводов [1]. Поэтому важнейшая проблема заключается в сохранении исправного состояния линейных участков промысловых и магистральных газопроводов (МГ). Подземные газопроводы, эксплуатируемые при нормальных режимах, могут сохраняться несколько десятилетий в рабочем состоянии. Сохранению исправного состояния подземных и надземных МГ способствуют контроль их технического состояния и своевременное проведение регламентных работ.

Дефекты на МГ появляются в результате коррозии и, реже, из-за механических повреждений. Определение мест коррозии и повреждений связано с временными и материальными затратами. Вскрытие газопровода для



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: anya-11-06@mail.ru, sputnik_s7@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

его непосредственного визуального обследования экономически невыгодно или невозможно. Обследование лишь наружной поверхности трубы обычно не дает желаемых результатов. Поэтому актуальным является мониторинг состояния подземных и надземных промысловых, МГ без их вскрытия. Решение этой задачи осложняется значительными техническими трудностями, однако современные методы и средства измерительной техники позволяют их преодолеть. Эти средства различаются по следующим признакам и параметрам:

- по физическим явлениям, заложенным в основу работы;
- по принципу действия;
- по чувствительности;
- по области применения;
- по локальности или глобальности диагностирования.

В системах обнаружения утечек газа в трубопроводах используются органолептические и инструментальные методы. Самый простой метод — это фиксация запаха. При визуальных методах контроля применяют вспениваемую мыльную эмульсию, фиксируют появление наледи или снежной шубы, появление желтой травы летом или бурого снега зимой. Безусловно, инструментальные методы являются более совершенными и точными. В их основе лежит применение приборов-газоанализаторов автоматического и ручного действия. В качестве автоматических газоанализаторов широко применяются датчики загазованности — это высокоточные измерительные устройства, используемые при непрерывном автоматическом контроле количества газов, содержащихся в воздухе. Сигнализаторы загазованности применяются в промышленных, бытовых и коммунальных помещениях. Датчики газа выпускаются в виде отдельных приборов, которые могут размещаться автономно и реагировать на изменение концентрации определенных газов. Они мгновенно реагируют на повышение концентрации газов, исходящих от газотранспортной системы.

Современные модели датчиков оснащены жидкокристаллическими дисплеями, на которых отображаются измеряемые показатели. Встроенная память позволяет фиксировать полученные данные и хранить все результаты измерений. Также на дисплей выводится информация о работоспособности прибора и имеющихся неполадках. Эта функция позволяет своевременно менять изношенные элементы.

Датчики контроля загазованности делятся на два основных вида: бытовые и промышленные. Сигнализаторы бытового применения обеспечивают ряд реакций на превышение установленной концентрации газа. Основные задачи промышленного датчика — измерение и отображение на дисплее показателей загазованности. Промышленные приборы применяются для решения более значимых задач и используются в составе автоматизированных систем вместе с пультом управления, на котором отображена информация, поступающая от датчиков газа.

По виду контролируемого газа различают метановые, пропановые сигнализаторы, а также сигнализаторы, предназначенные для измерения концентрации угарного газа или окиси углерода. Наряду с этим существуют комбинированные (многокомпонентные) сигнализаторы. Газовые датчики могут быть стационарными, которые работают только от электросети и располагаются вблизи от источника электропитания, или переносными, питание которых осуществляется от встроенных аккумуляторов.

Датчик загазованности является многофункциональным устройством и имеет функции звукового и светового оповещения. Например, в системе САКЗ-МК-1, если прибор отреагировал на загазованность, у него загорается индикатор и срабатывает громкий звуковой сигнал (рис. 1). Датчики загазованности имеют релейный выход для подключения дополнительных электрических устройств: оповещателей, вентиляторов, механизмов и приборов пожарного и диспетчерского пультов.

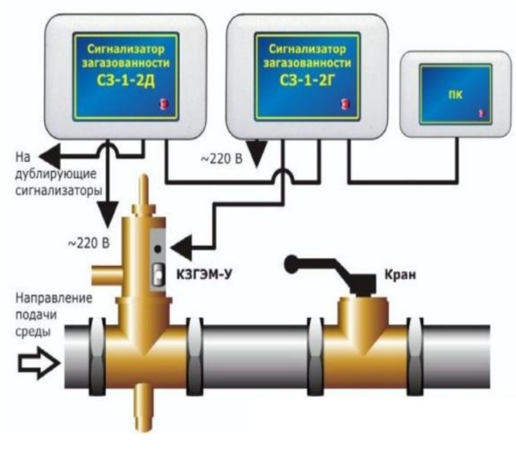


Рис. 1. Система сигнализации загазованности САКЗ-МК-1

Датчики загазованности, согласно СТО Газпром 5.37-2011, используются в узлах измерений расхода и количества горючего природного газа, поставляемого от объектов промысловой подготовки, подземных хранилищ, газоперерабатывающих заводов в магистральные газопроводы и далее транспортируемого потребителям Российской Федерации, в страны ближнего зарубежья, утилизируемого и потребляемого на собственные технологические нужды. На всем протяжении магистральных трубопроводов датчики загазованности использовать невыгодно. Кроме того, в труднодоступных местах расположения магистральных трубопроводов применение органолептических и инструментальных методов обнаружения утечек газа затруднительно.

Материалы и методы. Помимо вышеперечисленных методов обнаружения утечек газа в трубопроводах используют следующие [2]:

- метод анализа профиля давления;
- объемно-балансовый метод;
- метод анализа акустической эмиссии;
- метод переменного перепада давления;
- механический метод с применением тахометрических расходомеров;
- ультразвуковой метод измерения расхода.

Согласно методу выявления утечек по анализу профиля давления, проводятся моделирование распределения давления вдоль трубопровода и статистический анализ этого распределения. При утечке газа расход на контролируемом участке становится больше первоначального расхода на этом участке, а расход на участке после места появления утечки становится меньше первоначального расхода. Вследствие этого перепад давления на участке до места утечки увеличивается, а после утечки уменьшается, что приводит к появлению излома в приведенном профиле давления. Метод выявления утечек по анализу профиля давления работает только в стационарном режиме, так как многие факторы вызывают похожие изменения. Существенным недостатком данного метода является низкая точность и наличие ложных срабатываний.

Для уменьшения ложных срабатываний отклонения должны быть зафиксированы как минимум в двух соседних точках. Для этих же целей используется усредненный профиль распределения давления, который является квазистационарным профилем. Этот профиль получается в результате фильтрации давления в точках трубопровода. Усредненный профиль давления не является постоянным. Он изменяется, но медленнее, чем реальное давление, что приводит к увеличению времени обнаружения утечек. Данный метод из-за неспособности обнаружения небольших утечек и большой погрешности при определении координаты места утечки в настоящее время в основном используется только совместно с другими методами.

Объемно-балансовый метод контроля основан на том, что при образовании утечки расход на входе становится больше расхода на выходе. Кроме того, этот метод учитывает количество газа в самой трубе, которое при появлении утечки уменьшается. Для реализации этого метода необходимо измерять расход на границах контролируемого участка с помощью высокоточных приборов.

Параметром контроля при объемно-балансовом методе является не давление газа, а его нормализованный расход. Контроль участка газопровода осуществляется путем определения разности нормализованных объемов газа, входящих и выходящих из участка между двумя локальными расходомерами. Этот метод позволяет диагностировать как быстро развивающиеся разрывы в трубе, так и медленно развивающиеся утечки, а также утечки на очень больших участках трубопровода между расходомерами. Минимальная величина диагностируемой утечки определяется, в первую очередь, погрешностью измерения расхода и, при имеющихся в настоящее время средствах измерения расхода, находится на уровне 0,5–1,0 %. Точность контроля утечек зависит от точности расходомеров. Невозможно обнаружить утечку, расход которой меньше, чем погрешность измерения. В данном случае имеет значения не абсолютная погрешность, а только погрешность одного прибора относительно другого.

Объемно-балансовый метод не позволяет определять координату утечки — это его существенный недостаток. Кроме того, расход объемного баланса по участкам позволяет определять возможное место утечки в газопроводе только с точностью оценки этого параметра до конкретного участка. Это, в свою очередь, приводит к дополнительным затратам времени и потерям газа с момента утечки до момента её устранения.

Метод анализа акустической эмиссии лидирует в индустрии автоматического обнаружения утечек газа в трубопроводах [3]. Этот метод основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих при пластическом деформировании и микроразрушении материала трубопровода, а также при истечении газа через сквозные отверстия в трубе. Для приема сигналов акустической эмиссии применяются пьезоэлектрические преобразователи и быстродействующие измерители давления.

Преимущества данного метода:

- высокая чувствительность к развивающимся дефектам;
- малое время обнаружения;
- высокая точность определения координат места утечки.

Недостатком метода является трудность выделения сигнала акустической эмиссии на фоне шумов и помех. Для повышения помехоустойчивости и уменьшения количества ложных срабатываний применяются специальные методы обработки принимаемых сигналов.

При разработке системы обнаружения утечек газа на магистральных газопроводах и узлах учета расхода газа на технологическом объекте должны решаться следующие задачи:

- достижение независимости результатов измерения от изменения параметров среды за счет контроля давления газа;
- повышение точности контроля утечек и расхода газа.

Измерение расхода газа является важной задачей в газовой промышленности, так как система учета количества газа невозможна без средств измерения расхода. На объектах газовой промышленности для измерения расхода газа и его количества применяются тахометрические расходомеры и счетчики. В последнее время в индустрию контроля газопроводов также активно внедряются наиболее прогрессивные ультразвуковые расходомеры [4]. Однако в настоящее время для измерения расхода газа наибольшее распространение получил метод переменного перепада давления на сужающем устройстве (СУ). Суть метода состоит в измерении перепада давления до и после СУ, установленного в потоке газа. Объемный расход газа Q для специальных СУ определяют по формуле:

$$Q = CE\varepsilon F_0\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}},$$

где C — коэффициент истечения, представляющий собой отношение действительного расхода к теоретическому; E — коэффициент скорости входа; ε — коэффициент расширения, учитывающий увеличение удельного объема газа; F_0 — площадь СУ, м^2; Δp — перепад, создаваемый СУ, Па; ρ — плотность газа, кг/м^3.

Достоинства метода переменного перепада давления:

1. Универсальность. Данный метод применяется для измерения расхода практически любых сред: жидкости, газа, пара. Для вязких жидкостей применяются СУ специальной формы.
2. Низкая первоначальная стоимость. Стоимость расходомера, основанного на методе переменного перепада давления, складывается, исходя из стоимости СУ, импульсных линий и датчика дифференциального давления.
3. Простая методика поверки. Для периодической поверки расходомеров требуется измерить геометрические размеры СУ и поверить датчик дифференциального давления.
4. Отсутствие движущихся частей.
5. Возможность измерения расхода в условиях высокого давления. Давление в трубопроводе может достигать 40 МПа.
6. Возможность измерения расхода в широком диапазоне температур измеряемой среды — от минус 200°С до плюс 1000°С.
7. Широкий диапазон типоразмеров. Рассматриваемый метод используется на трубопроводах в диапазоне диаметров условного прохода от 15 до 2000 мм.

Недостатки измерения расхода газа методом переменного перепада давления на СУ:

1. Узкий динамический диапазон. Стандартный динамический диапазон СУ приблизительно 1:3. Такое ограничение связано, в первую очередь, с квадратичной зависимостью между расходом и перепадом давления на СУ. Увеличить динамический диапазон позволяет использование высокоточных датчиков дифференциального давления.
2. Высокая стоимость эксплуатации. Расходомеры, основанные на СУ, требуют периодического обслуживания, которое включает в себя: измерение геометрических размеров сужающего устройства, прочистку импульсных линий, прогрев импульсных линий, установку нуля на датчике дифференциального давления.
3. Низкая точность измерений. Погрешность измерений обычно составляет 3,0–3,5 %.

Принцип действия тахометрических расходомеров основан на зависимости скорости вращения преобразователя, установленного в трубопроводе, от расхода газа. У расходомеров типа «счетчик» вал преобразователя расхода через редуктор связан со счетным механизмом, что позволяет измерять количество прошедшего газа. Достоинствами таких приборов являются быстродействие и большой диапазон измерений.

Погрешность счетчиков составляет 0,5–1,5 %, использование тахометрических преобразователей позволяет снизить погрешность преобразования расхода в частоту вращения преобразователя до 0,3 %. Основные недостатки тахометрических расходомеров — износ опор и наличие подвижных элементов. Недостаток по отношению к расходомерам с СУ — необходимость в поверочных установках.

Метод, на основе которого работают ультразвуковые расходомеры, основан на явлении смещения звукового колебания движущейся средой. Этот метод имеет следующие недостатки:

- зависимость собственной скорости ультразвуковых колебаний от физико-химических свойств измеряемой среды;
- скорость потока усредняется вдоль ультразвукового пучка, а не по сечению трубы.

Усреднение скорости потока заставляет разработчиков снабжать конструкцию дополнительными датчиками или отражателями, что делает расходомер более сложным. При этом возрастает вероятность ошибки при выходе из строя датчиков системы.

Достоинства данного метода:

- отсутствие перепада давления;
- высокое быстродействие;
- отсутствие подвижных элементов.

Результаты исследования. Анализ показывает, что задача обнаружения и локализации (точного определения места) утечки газа не может быть решена с использованием одного из рассмотренных методов. С учетом достоинств и недостатков методов, рассмотренных в данной статье, предлагается решить задачу с применением трех методов и поэтапно:

- определить участок с утечкой газа между станциями методом расхода объемного баланса;
- методом анализа акустической эмиссии установить локальный участок повреждения трубопровода и утечки газа;
- с помощью ультразвуковой дефектоскопии определить координаты утечки в пределах установленного локального участка повреждения.

Для контроля горизонтальных и прямых участков газопровода и точной фиксации мест утечек с помощью ультразвукового сканера возможно применение различных роботов [5–7], например, видеокроулеров, которые представляют собой мобильные и универсальные средства инспекции трубопроводов. Они подходят для различного применения благодаря модульной конструкции и способности осматривать внутренности труб с диаметрами от 150 до 900 мм. На рис. 2 показан один из таких роботов — видеокроулер Rovver 600. Дистанционное управление робота дает возможность контролировать фокус и освещение, а также направлять ход в области препятствий или ответвлений.



Рис. 2. Видеокроулер Rovver 600

Обсуждение и заключения. Авторы предлагают для повышения надежности обнаружения и локализации утечки газа применять комбинированную трехэтапную методику, включающую последовательное использование метода расхода объемного баланса, метода анализа акустической эмиссии и ультразвуковую дефектоскопию. В определенных ситуациях рекомендуется применение специальных роботов. Авторы считают, что роботы должны снабжаться датчиком обнаружения 90-градусного изгиба, установленным на головном звене, а также датчиками скорости и пройденного пути для обеспечения точного позиционирования. Это позволит уменьшить время диагностирования газопроводов различных типов и сократить затраты на контроль их состояния.

Анализ информации по авариям в газовом комплексе имеет большое значение, прежде всего, для оценки показателей риска и надежности работы газотранспортной системы. Результаты анализа требуются для обоснования решений при проектировании объектов системы газоснабжения, а также при планировании мероприятий по повышению их надежности и безопасности в процессе эксплуатации.

Библиографический список

1. Единые технические требования на оборудование узлов измерения расхода и количества природного газа, применяемых в ОАО «Газпром» : СТО Газпром 5.37–2011. Утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «Газпром» от 21.12.2010 № 500 [Электронный ресурс] / Elima.ru. — Режим доступа: https://elima.ru/docs/index.php?id=6291 (дата обращения : 23.12.2018).

2. Чупин, В. Р. Методы обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов / В. Р. Чупин, Е. В. Гуськов, Д. И. Майзель // Известия вузов: Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2012. — № 2 (3). — С. 123–127.

3. ГОСТ Р 52727–2007.Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/gost-r-52727-2007 (дата обращения : 23.12.2018).

4. Расход и количество природного газа. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода : СТО Газпром 5.2-2005. Утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «Газпром» от 10.10.2005 № 271 [Электронный ресурс] / Охрана труда в России. — Режим доступа : https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/248957/ (дата обращения : 23.12.2018).

5. Поезжаева, Е. В. Разработка робота для контроля трубопроводов / Е. В. Поезжаева, А. Г. Федотов, П. В. Заглядов // Молодой ученый. — 2015. — №16. — С. 218–222.

6. Программная система тестирования и отладки управляющих программ для робототехнического комплекса: Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ / А. П. Частиков [и др.]. — № 2011611987; дата рег. 11.01.2011 г.

7. Частиков, А. П. Компьютерная симуляция программного управления виртуальным роботом. Исследование, разработка, испытание / А. П. Частиков, С. П. Глушко, К. Е. Тотухов. — Saarbrucken : Lap Lambert Academic Publishing, 2012. — 136 с.

Сдана в редакцию 25.02.2019
Принята к публикации 05.04.2019

Об авторах:

Лебедь Анна Даниловна,
студентка кафедры «Системы управления и технологические комплексы» Кубанского государственного технологического университета, (РФ, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4263-8806
anya-11-06@mail.ru

Глушко Сергей Петрович,
доцент кафедры «Системы управления и технологические комплексы» Кубанского государственного технологического университета, (РФ, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7087-6572
sputnik_s7@mail.ru